

**А.В.ЕФИМОВ**, д-р техн. наук, **Е.Д. МЕНЬШИКОВА**, канд. техн. наук,  
**Т.В.ПОТАНИНА, Т.А.ГАРКУША**

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС С ВВЭР-1000

Запропоновано математичну модель повірочного розрахунку парогенератора АЕС з ВВЕР-1000. Модель може бути використано як елемент єдиної імітаційної моделі енергоблоку для розв'язання задачі розподілу навантажень між енергоблоками електростанцій.

В современных условиях продолжает оставаться важной проблемой вопрос повышения качества функционирования, надежности и безопасности энергообъектов и, в частности, энергоблоков электростанций. Его решению посвящено множество работ и ведущиеся в настоящее время во всем мире разработки эффективных методов управления энергетическими установками. Реализовать задачи управления, среди которых очень актуальна задача управления распределением нагрузок между энергоблоками электростанций, позволяет использование на ТЭС и АЭС автоматизированных программных комплексов в составе АСУ ТП. Основой функционирования последних является имитационная модель технологических процессов основного и вспомогательного оборудования энергоблоков электростанций, решающая методами численного эксперимента прямые и обратные задачи расчета параметров на различных режимах эксплуатации. Успешная работа по созданию имитационных моделей сложных теплоэнергетических объектов велась в ИПМаш НАН Украины, где были разработаны имитационные модели конденсационных паротурбинных установок для ТЭС и АЭС, описанные в [1]. В настоящее время эта работа продолжается в НТУ «ХПИ» на кафедре парогенеростроения. В ней основной акцент делается на разработку и реализацию в виде автоматизированного программного комплекса единой имитационной модели теплоэнергетических процессов в котельном, турбинном, основном и вспомогательном теплотехническом и тепломеханическом оборудовании электростанций [2]. Опыт эксплуатации программного комплекса показывает возможность его дальнейшего совершенствования.

Анализ существующих моделей основного и вспомогательного оборудования энергоустановок и подходов к решению задачи управления распределением нагрузок между энергоблоками электростанций [3] показал, что включение в разрабатываемую единую имитационную модель блока «Парогенератор» позволит более эффективно решать задачу распределения нагрузок на АЭС.

Парогенератор (ПГ), обогреваемый водой под давлением, представляет собой однокорпусный двухконтурный теплообменный аппарат горизонталь-

ного расположения с погружным трубным пучком. ПГ состоит из корпуса, входного и выходного коллекторов, U-образного трубного пучка поверхности теплообмена, раздающего коллектора питательной воды, встроенного сепарационного устройства, пароотводящей системы, системы продувок и дренажа. Вода первого контура циркулирует внутри теплообменных труб. Циркуляция котловой воды в межтрубном пространстве – естественная с поперечным омыванием труб. Питательная вода подается в опускной участок контура естественной циркуляции, где смешивается с водой, имеющей температуру насыщения, поступает снизу на теплопередающую поверхность, нагревается и кипит. Парожидкостная смесь поступает в сепаратор, где происходит отделение сухого насыщенного пара.

В качестве объекта моделирования была рассмотрена теплотехническая схема парогенератора без пароперегревателя и выделенного в отдельный участок экономайзера (см. рис. 1). Питательная вода с температурой  $t'_2$  подается в корпус парогенератора, где смешивается с циркулирующей водой, поступает вниз испарителя и кипит на наружной поверхности труб. Подогрев питательной воды до  $t''_2 = t_s$  (температуры насыщения рабочего тела) осуществляется в испарителе за счет конденсации некоторого количества пара.

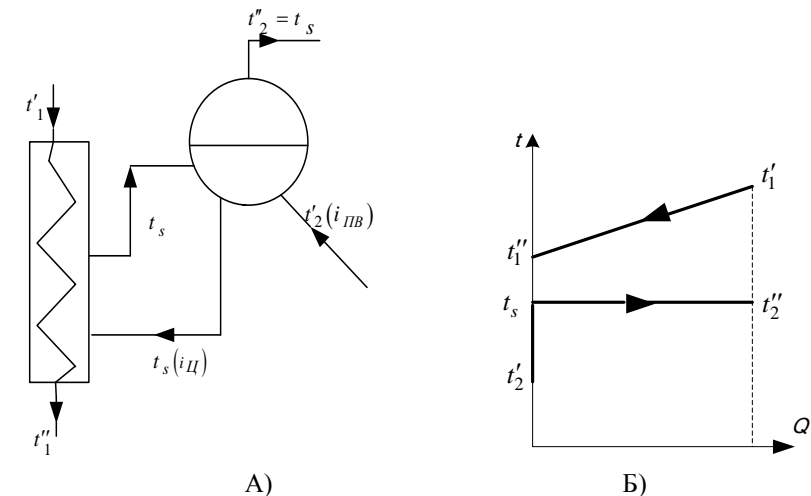


Рис. 1. А – Принципиальная тепловая схема ПГ; Б –  $t, Q$  - диаграмма ПГ

Математическая модель парогенератора включает следующие зависимости [4-7]:

а) уравнение теплового баланса для всего парогенератора

$$\begin{aligned} Q_{ПГ} &= Q_{ЭК} + Q_{ИСП}; \\ G(i'_1 - i''_1)\eta_{ПГ} &= (D + D_{ПР}) \cdot (i'_s - i_{ПВ}) + Dr, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q_{ПГ}$  – количество тепла, переданного от теплоносителя рабочему телу в ПГ,  $Q_{ЭК}$ ,  $Q_{ИСП}$  – тепловые мощности экономайзерной и испарительной частей ПГ соответственно,  $G$  – массовый расход теплоносителя,  $i'_1$  и  $i''_1$  – энтальпии теплоносителя на входе и выходе из ПГ,  $\eta_{ПГ}$  – КПД ПГ,  $D$  – паропроизводительность ПГ,  $D_{ПР} = (0,005 \div 0,01)D$  – расход воды на продувку ПГ,  $i_{ПВ}$  – энтальпия питательной воды,  $i'_s$  – энтальпия воды при температуре насыщения,  $r$  – теплота парообразования;

б) уравнения теплового баланса для отдельных участков:  
для экономайзерной части

$$Q_{ЭК} = (D + D_{ПР}) \cdot (i'_s - i_{ПВ}), \quad (2)$$

для испарительной части

$$Q_{ИСП} = Dr; \quad (3)$$

в) уравнение материального баланса рабочего тела

$$D_{ПВ} = D_{ПР} + D_{ИСП} = D_{ЭК}, \quad (4)$$

где  $D_{ПВ}$ ,  $D_{ЭК}$ ,  $D_{ИСП}$  – расходы: питательной воды, рабочего тела через экономайзерную и испарительную зоны соответственно.

г) уравнение материального баланса для теплоносителя

$$G_P = 4 \cdot G, \quad (5)$$

где  $G_P$  – расход теплоносителя через реактор;

г) уравнение смешения двух потоков воды – питательной воды с водой контура естественной циркуляции

$$D_{Ц} i_{Ц} = D \cdot i_{ПВ} + (D_{Ц} - D) \cdot i'_s \quad (6)$$

или

$$i_{Ц} = [i_{ПВ} + (k_{Ц} - 1)i'_s] / k_{Ц}, \quad (7)$$

где  $i_{Ц}$  – энтальпия циркулирующей воды,  $k_{Ц} = D_{Ц} / D$  – кратность циркуляции,  $D_{Ц}$  – циркуляционный расход;

д) уравнения теплопередачи в испарительной и экономайзерной частях ПГ

$$Q_{ИСП} = k_{ИСП} F_{ИСП} \Delta t_{ср}^{ИСП}, \quad (8)$$

$$Q_{ЭК} = k_{ЭК} F_{ЭК} \Delta t_{ср}^{ЭК}, \quad (9)$$

где  $k_{ИСП}$ ,  $k_{ЭК}$  – коэффициенты теплопередачи,  $F_{ИСП}$ ,  $F_{ЭК}$  – площади теплопередачи  $\Delta t_{ср}^{ИСП}$ ,  $\Delta t_{ср}^{ЭК}$  – средние температурные напоры испарительной и экономайзерной частей ПГ.

Для испарительного участка среднелогарифмический температурный напор равен

$$\Delta t_{ср}^{ИСП} = (\Delta t_{\delta}^{ИСП} - \Delta t_{м}^{ИСП}) / \ln(\Delta t_{\delta}^{ИСП} / \Delta t_{м}^{ИСП}), \quad (10)$$

где  $\Delta t_{\delta}^{ИСП} = t'_1 - t_s$ ,  $\Delta t_{м}^{ИСП} = t''_{ИСП} - t_s$  – больший и меньший температурный напоры,  $t''_{ИСП}$  – температура теплоносителя на выходе из испарительного участка.

Для экономайзерного участка средний температурный напор

$$\Delta t_{ср}^{ЭК} = (\Delta t_{\delta} + \Delta t_{м}) / 2, \quad (11)$$

где  $\Delta t_{\delta} = t'_{1ЭК} - t'_{2ЭК}$ ,  $\Delta t_{м} = t'_{1ЭК} - t'_{2ЭК}$  – больший и меньший температурный напоры,  $t'_{1ЭК} = t''_{ИСП}$ ;  $t'_{1ЭК} = t'_1$ ;  $t'_{2ЭК} = t'_{2Ц}$ ;  $t'_{2ЭК} = t_s$ .

Кипение воды – основной процесс в ПГ, в результате которого вырабатывается необходимое количество водяного пара. В испарителях с естественной циркуляцией и совмещенным сепарационным объемом гидродинамика двухфазного потока (движение пароводяной смеси) – безнапорное движение пароводяной смеси, при котором происходит свободный подъем паровой фа-

зы в слое воды, средняя скорость которой близка к нулю (кипение в большом объеме).

Рассмотрим испарительный участок ПГ. Коэффициент теплообмена от теплоносителя к стенке трубы рассчитывается по формуле:

$$\alpha_1 = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43}, \quad (12)$$

где  $\text{Re} = \frac{v_1 d_B \rho_1}{\mu_1}$  – критерий Рейнольдса,  $v_1$  – скорость теплоносителя,  $\rho_1^{-1}$  – удельный объем воды,  $\mu_1$  – динамическая вязкость,  $d_B$  – внутренний диаметр трубы.

Коэффициент теплообмена от стенки к кипящей воде может существенно меняться по длине трубной системы, поэтому он рассчитывается для входного и выходного (по теплоносителю) участков поверхности теплообмена:

$$\alpha_2 = 8,22 \cdot q^{0,7} \cdot 10^{-3}. \quad (13)$$

Расчет  $\alpha_2$  выполняется методом последовательных приближений, задавая предварительным значением удельного теплового потока  $q'$ . Вычисляется коэффициент теплопередачи

$$k' = \left[ \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^{-1}, \quad (14)$$

где  $s_{cm}$  – толщина стенки,  $\lambda_{cm}$  – теплопроводность стенки; далее определяется тепловой поток  $q'' = k' \Delta t_{\delta}^{ИСП}$  и выполняется проверка: находится ли отношение  $q'/q''$  в интервале  $[0,95 \div 1,05]$  или нет. Если да – полученные значения  $\alpha_2$  и  $k'$  можно считать окончательными, в противном случае значения уточняются.

Средний коэффициент теплопередачи на испарительном участке равен

$$k_{ИСП} = \frac{k' + k''}{2}, \quad (15)$$

причем коэффициент теплопередачи для выходного сечения испарительного участка  $k''$  задан.

Аналогично (12) и (14) вычисляются коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке  $\alpha_{1ЭК}$  и коэффициент теплопередачи  $k_{ЭК}$  на экономай-

зерном участке (коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к рабочему телу  $\alpha_{2ЭК}$  задан).

Гидродинамический расчет ПГ сводится к определению затрат мощности на преодоление гидравлических сопротивлений по всему тракту:

$$N = G \cdot \Delta p / (\rho_{cp} \eta_{ГЦН}), \quad (16)$$

где  $\eta_{ГЦН}$  – КПД главного циркуляционного насоса,  $\rho_{cp}$  – плотность теплоносителя,  $G$  – расход теплоносителя,  $\Delta p$  – величина гидравлического сопротивления труб теплопередающей поверхности (зависит от скорости теплоносителя в трубах, его плотности и суммарного коэффициента сопротивления труб),  $N$  – мощность главного циркуляционного насоса, затрачиваемая на преодоление гидравлического сопротивления. Вычисление всех местных сопротивлений для первого контура ПГ (гидравлическое сопротивление входного и выходного коллекторов, сопротивление труб теплопередающей поверхности) и второго его контура (сопротивления жалюзийных сепараторов и выхода пара из ПГ) подробно описано в [7].

Задача, которую предполагается решить с помощью описанной математической модели, заключается в определении паропроизводительности парогенератора как функции известных теплофизических характеристик рабочего тела и теплоносителя, а также известной площади теплопередающей поверхности. Сформированная модель может быть использована для совершенствования единой имитационной модели ядерной энергоустановки с целью повышения эффективности эксплуатации энергоблоков АЭС при управлении распределением нагрузок между ними.

**Список литературы:** 1. Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. – К.: Нак. думка, 1991. – 201 с. 2. Ефимов А.В., Куценко А.С., Фролов Б.И. и др. Применение объектно-ориентированного подхода для разработки имитационной модели технологических процессов тепловых энергетических установок // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2002. – № 2. – С. 78-84. 3. Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д., Потанина Т.В. и др. Анализ математических методов и подходов к решению задачи управления распределением нагрузок между энергоблоками электростанций // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2004. – № 2. – С. 72-75. 4. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с. 5. Ганчев Б.Г., Калишевский Л.Л., Демешев Р.С. и др. Ядерные энергетические установки. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 629 с. 6. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с. 7. Ремжин Ю.Н., Славиков В.А. Основы компоновки и теплового расчета парогенераторов атомных электростанций. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 192 с.

Поступила в редколлегию 28.04.2005.